科技与社会
S&T and Society

引用格式：贺志雄，胡兆民，王竑晟，等．持续推进反刍家畜全生命周期营养工程的创新与发展．中国科学院院刊，2023, 38(7): 1067-1076

He Z X, Hu Z M, Wang H S, et al. Devoting continuous efforts to innovations and development of ruminant livestock life-cycle nutrition program. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(7): 1067-1076

持续推进反刍家畜全生命周期营养工程的创新与发展

贺志雄[1,2]　胡兆民[3]　王竑晟[4]　焦金真[1]　韩雪峰[1]　刘　勇[1]　汤少勋[1]
周传社[1,2]　王　敏[1,2]　谭支良[1,2*]

1 中国科学院亚热带农业生态研究所　中国科学院亚热带农业生态过程重点实验室　长沙　410125
2 中国科学院大学　现代农业科学学院　北京　100049
3 呼伦贝尔农垦集团　海拉尔　021008
4 中国科学院　科技促进发展局　北京　100864

摘要　牛、羊等反刍家畜可为人们提供优质牛羊肉和奶类，是可满足人民群众日益多元化食物消费需求的优质蛋白来源，发展高质量草食畜牧业是践行“大食物观”的具体措施。而基于全生命周期营养需求特征的饲草、饲料协同供给是实现反刍家畜产业节本增效、走高质量发展道路的关键要素。全生命周期营养工程是在吸收传统反刍家畜营养与日粮配制技术原理，以及对生命和健康认识取得新突破基础上发展起来的，其精髓在于依据系统整体营养调控理论，以动物全生命周期营养的短期和长期效应理论为基础，对日粮配制方案进行优化，并结合大数据、智能技术等而构建的精准营养理论和工程体系。与传统日粮优化配制技术相比，它具有明显的科学性、系统性和先进性。文章在简述反刍家畜全生命周期营养理论内涵及其意义的基础上，提出了我国反刍家畜全生命周期营养工程体系发展中存在的关键科技问题；对目前团队在反刍家畜特定阶段营养调控理论、日粮配制，以及生命早期营养对后代的长期影响基础研究等方面的实践探索做了概述。并以呼伦贝尔农垦现代生态草原羊产业发展为例，从全生命周期划分、全日粮配方原则、全产业链发展等方面提出了建设反刍家畜全生命周期营养工程、促进反刍家畜产业高质量发展的思考。

关键词　全生命周期营养，反刍家畜，日粮配制，大食物观

CSTR　32128.14.CASbulletin.20221229001

*通信作者
资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA26040300、XDA26050102）
修改稿收到日期：2023年5月25日

1 发展反刍家畜全生命周期营养工程的背景

习近平总书记在2017年中央农村工作会议上指出，“老百姓的食物需求更加多样化了，这就要求我们转变观念，树立大农业观、大食物观，向耕地草原森林海洋、向植物动物微生物要热量、要蛋白，全方位多途径开发食物资源”。牛、羊等反刍家畜因其特殊的消化道结构与功能，可将猪禽难以利用的高纤维秸秆与饲草等转化为高品质的肉、奶等畜产品；同时牛羊等反刍家畜动物产品低胆固醇、高共轭亚油酸、高肌氨酸等特性使其在减少脂肪沉积、预防糖尿病、癌症和心血管疾病等服务人类健康方面表现出比其他动物性产品更为积极的功效，是可满足人民群众日益多元化食物消费需求的优质蛋白来源。发展以牛、羊等反刍动物为主的草食畜牧业是实现资源综合利用和农牧业可持续发展的必由之路，是适应人民消费结构升级的战略选择，是落实“大食物观”的客观需要。

随着人均收入和消费水平不断提高，我国居民的膳食结构日益优化。近10年来，我国牛羊肉及奶类的生产与消费一直处于快速增长期。2021年，我国人均牛肉和羊肉消费量相对2013年分别增加66.7%和55.6%①，奶类消费量增加23.1%；而同期牛羊肉及奶类产量分别增加13.4%、25.4%和21.1%，牛羊肉增长速度显著低于消费量的增长速度。在全国肉类总产量占比方面，我国牛羊肉产量仍处于弱势地位，2021年牛羊肉产量仅占肉类总产量的13.5%，而猪肉产量占58.9%。高比例耗粮型畜产品生产与我国自然资源禀赋和种植业副产物资源条件极不匹配，不利于国家粮食安全战略目标的实现。从国际方面来看，2020年世界平均牛羊肉产量占肉类总产量比例为26.1%，发达国家如美国、加拿大、法国、意大利、英国等在22.6%—29.8%，而新西兰和澳大利亚分别高达79.9%和64.4%。因此，对比国内外数据，未来我国草食畜牧业动物产品的消费需求仍将持续增长，我国草食畜牧业发展潜力巨大，2022年中央一号文件就明确提出“加快扩大牛羊肉和奶业生产”，要发展事关居民的“肉盘子”和“奶罐子”。

同时，我国部分畜产品出现了结构性相对过剩：一般性同质化产品量大价低，高品质产品供给无法满足消费需求。因此，推动畜牧业供给侧结构性改革、走高质量发展道路是践行“大食物观”的具体措施，是我国草食畜牧业发展的必然趋势[1]。草食畜牧业发展，营养和饲料是基础，而如何基于反刍家畜全生命周期营养需求特征保障饲草饲料协同供给，是实现草食畜牧业“节本增效”以提高产业竞争力的挑战性难题。实施反刍家畜全生命周期营养战略、持续推进反刍家畜全生命周期营养工程的创新与发展将为我国“大粮食安全”优质乳肉供给保驾护航。

2 反刍家畜全生命周期营养主要内涵与服务目标

2.1 反刍家畜全生命周期营养主要内涵

（1）*动物全生命周期的概念*。动物全生命周期指“从胎儿到生命的终点”，即包括孕育期、成长期、成熟期、衰老期直至生命终结的整个过程[2]。反刍家畜主要包括牛、羊等具有反刍现象的草食家畜，根据经济用途可分为肉用、乳用、皮用、绒用和兼用五大类型。对于以提高经济效益为最终目标的现代畜牧生产，不同类别反刍家畜特异的遗传禀赋特点使其具有不同的全生命周期特征。在现代畜牧业生产体系中，肉用反刍家畜全生命周期主要分为胎儿期和生长期以缩短因长养殖周期而产生的高饲养成本，育肥肉羊生命周期一般至出生后6—8月龄出栏，育肥肉牛生命周期至出生后15—18月龄出栏；而乳用和肉用繁殖反刍

① 国家统计局. 中国统计年鉴2022. [2023-06-25]. http://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2022/indexch.htm.

家畜全生命周期可划分为胎儿期、生长期、育成期、成年期和淘汰期，生命周期长达6—8年，最终淘汰屠宰肉用。

（2）全生命周期营养的概念。其是在“成人疾病胎儿起源学说”理论基础上提出的[3]。虽然动物生命周期划分为多个不同阶段，但每个阶段之间存在内在联系，只有系统全面做好每一阶段的营养工作，才能发挥动物生产性能和经济效益的最优潜能。幼龄阶段动物生长发育可长期影响机体生产性能，对奶牛的研究发现犊牛断奶前日增重每多100 g，奶牛第一泌乳期就额外增产155.14 kg牛奶[4]。因此，反刍家畜全生命周期营养理论除了关注家畜不同生理阶段短期用于维持、生长和生产的营养需求，更强调注重生命早期营养对机体产生的长期系统性营养效应。

（3）反刍家畜全生命周期营养工程。其是依据系统整体营养调控理论，在吸收传统反刍家畜营养日粮配制技术原理，以及最新研究进展的基础上发展起来的。其主要内涵是以提质增效为根本，围绕特定生产和营养调控目标，根据当地可利用饲草饲料资源，以全生命周期营养短期和长期效应理论为基础，对日粮配制方案进行优化，构建现代系统营养理论和工程技术体系。其核心是改变目前静态描述的饲养标准，在动态营养需求基础上考虑整体营养调控的原则，依据营养需要周期性变化、营养素沉积规律、功能成分形成机制等生物学理论基础，发展不同阶段不同目标下营养调控系统理论、技术、模式和产品，同时结合云计算、5G通信和“工业4.0”等现代化技术实现个性化全生命周期精准营养控制。饲料是支撑现代畜禽养殖业的基础产业，经过30多年的持续发展与完善，我国已经形成门类比较齐全、功能比较完备的饲料产业体系。反刍家畜全生命周期营养工程的关键是反刍家畜全生命周期营养理论指导下的日粮优化配制。卢德勋[5,6]对我国日粮配制技术发展进行了梳理，认为其历经了由验方阶段向基于饲养标准的特定阶段日粮优化配制阶段的发展过程，并基于日粮存在状态、日粮营养学原理、日粮优化设计和日粮营养诊断4个方面提出日粮学理论和技术体系的基本框架。参考未来中国营养健康事业将经历大众干预、特殊人群干预和个性化全生命周期精准营养3个发展阶段的经验[7]，反刍家畜日粮配制技术将进一步由特定阶段日粮配制向全生命周期系统精准日粮设计的第3阶段发展。

2.2 反刍家畜全生命周期营养理论契合我国牛羊产业发展新需求

（1）全生命周期营养与牛羊产业提质增效高质量发展需求相契合。近年来以新发展理念为引领、以发展优质牛羊乳肉为重点，我国反刍家畜产业加速向绿色化、高端化、智能化转型升级。“健康与疾病的发育起源学说”认为生命早期是全生命周期中最重要的阶段，由于机体的“代谢记忆”机制，此阶段营养供给直接影响机体后期生命过程和健康走向[8]。因此，发展全生命周期营养理论与工程技术对成年后牛、羊生鲜乳和生鲜肉产量与品质提升、继而生产高价值乳肉产品及增加养殖效益有重要指导意义。

（2）全生命周期营养符合牛羊产业可持续发展需求。全生命周期营养强调实施覆盖生命各个阶段、系统连续的全程营养策略，只有系统做好生命周期每一阶段的营养供给工作，才能保障产业的可持续健康发展。幼龄家畜是牛羊产业后备力量，幼龄反刍家畜的培育质量对其育成后的生产和繁殖性能发挥至关重要。大力发展幼龄反刍家畜优化培育技术，筑牢全生命周期营养理论体系，对于实现反刍家畜产业增产增效和长期可持续发展具有重要现实意义。

（3）全生命周期营养与动物福利发展趋势相契合。动物福利概念是基于人道主义，以及改善动物饲养方式以提高动物产品质量和生物安全两个方面提出的。国内外对动物福利日趋重视。例如，欧盟自2012年1月1日开始全面禁止采用传统的蛋鸡笼养生产方式，而一律采用大笼饲养、自由散养、棚舍平养和有机饲

养等家禽福利较好的养殖方式[9]。发展农场动物福利与食品质量和安全、生态和谐、人类发展等存在紧密联系，可最大限度为人类服务。因此，通过发展反刍家畜全生命周期营养以适应未来饲养模式的改变且切实保障动物健康，符合动物福利全球发展趋势。

2.3 反刍家畜全生命周期营养理论体系服务目标

（1）区域饲草饲料资源合理配制与低成本养殖协同的目标。反刍家畜饲料主要由高纤维的粗饲料、高淀粉的精饲料，以及提供矿物质和微量元素的预混料3部分组成。在保障不同种类反刍家畜各阶段营养需要和正常生理活动的基础上，反刍家畜全生命周期营养理论体系充分利用当地饲草饲料资源禀赋，以期达到与区域资源相匹配的最经济合理的生产目标，实现饲养效益最大化。

（2）功能型饲料产品研发与高品质生鲜乳肉协同的目标。功能型饲料是指在满足动物维持、生长和生产需要基础上，为达到特定养殖目的或生产富含功能组分（如乳脂、风味氨基酸、共轭亚油酸等）乳肉产品的专用饲料，其发挥作用的关键是饲料（精料与粗料）组分的合理配制，以及添加功能性糖类、功能性脂类、功能性氨基酸与肽、功能性矿物元素、多酚类化合物和抗氧化剂等具有特殊生物学功能的功能因子[10]。因此，基于全生命周期营养理论解析功能型营养素在不同种类反刍家畜发挥特定功能的生理阶段、早期调控靶点与调控机制，研发功能型饲料可服务于反刍家畜高品质生鲜乳和生鲜肉目标，生产功能型动物产品[1]。

（3）传统牛羊养殖产业转型升级与区域生态草牧业发展协同的目标。原农业部2015年《关于促进草食畜牧业加快发展的指导意见》指出以草原牧区、农牧交错带、传统农区、南方草山草坡地区4类主产区为主攻方向，积极发展草食畜禽生产。根据不同草地类型资源禀赋，构建不同种类反刍家畜与区域资源、环境相匹配的养殖模式和全生命周期饲草饲料供给方案，以打造区域化、差异化乳肉产品品牌实现牛羊养殖产业高质量转型发展。

3 反刍家畜全生命周期营养工程发展的关键科技问题

针对规模化养殖条件下全生命周期不同阶段营养参数的差异性需求与精准营养供给技术需求，围绕反刍家畜养殖过程中饲草饲料、营养需求、饲料利用和智慧养殖4个关键环节开展针对性研究与技术攻关。

3.1 反刍家畜饲草饲料营养组特征图谱与营养参数库

饲草饲料中的营养与活性物质等是维持和调节动物生命活动的关键成分，是反刍家畜养殖生产中最重要的投入品，其成本占总生产成本的60%—70%。高效利用饲草、饲料资源是降低养殖成本的重要途径，其基础是明确饲草、饲料原料中所含可吸收养分及其与动物生产活动间的关系。针对饲草、饲料营养成分受采收、环境、储存、加工等条件影响造成营养质量参差不齐，以及我国至今未能建立基于健康导向的反刍家畜饲草、饲料营养参数库继而影响日粮优化配制的现状，分类解析反刍家畜主产区常见饲草饲料资源化学营养特征（如非结构性碳水化物、过瘤胃淀粉、过瘤胃蛋白、中性洗涤纤维等）与物理营养特征（如容重、溶解度、纤维结构、流通速率等）及其与饲草、饲料营养价值和生物学效价之间的“谱—效”关系，构建饲草、饲料营养参数库及其共享平台，为我国本土饲草、饲料资源应用于反刍家畜日粮配制提供关键数据支撑。

3.2 反刍家畜全生命周期营养诊断工程与动态需求参数

动物生长是高度综合的过程，受遗传基因、营养供给、环境条件等多种因素影响，其中营养是反刍家畜生长发育和维持健康的物质基础。全生命周期营养管理策略是促进反刍家畜健康、提高生产性能的重要

途径。针对我国反刍家畜营养诊断基础数据缺乏、生命周期划分粗放、动态营养需求参数研究滞后等问题，开展全生命周期不同阶段反刍家畜整体层次、消化层次及代谢层次的营养监测，挖掘从繁殖母畜到其子代全生命周期营养转变的关键表征因子，重塑反刍家畜营养周期分级标准，并研究不同营养周期关键营养素动态需求参数，构建智能预测模型，为反刍家畜精准营养供给提供理论支撑。

3.3 反刍家畜饲草饲料营养组体内营养代谢途径与靶向配制技术

饲草饲料是包含多种营养素的复合体，不同营养素之间、营养素与加工工艺之间，以及营养素与肠道微生物之间存在组合效应，影响动物的生理生化状态及其对营养成分的利用效率。针对目前饲草饲料在反刍家畜体内代谢的系统性，以及生命早期营养对动物长期程序化影响机制研究滞后等现状，从基因、蛋白质、代谢水平等层面系统研究生命早期关键营养素或功能因子对反刍家畜短期和长期的影响效应及机理，解析关键营养素在反刍家畜不同生理阶段消化道降解和吸收、肝脏重分配、肌肉和脂肪组织利用与沉积等过程中的代谢途径，阐明生鲜乳和生鲜肉等动物性产品重要功能成分的生物合成过程及其前体物累积规律、影响因素与调控机理。以节本增效为目标研发适应不同阶段反刍家畜营养特征的日粮优化配制技术，基于反刍家畜生鲜乳和生鲜肉功能成分调控靶点开发提高乳肉产品品质的靶向控制技术和功能型饲料产品，可为生产高端反刍家畜动物性产品奠定基础。

3.4 反刍家畜健康信息感知与精细高效养殖

基于互联网的反刍家畜高效养殖技术逐渐呈现出集精细饲养、环境智能监控、疾病诊断自动识别于一体的特点。针对现阶段数据采集维度单一、采集可靠性较差、数据挖掘不足等阻碍反刍家畜智能养殖的瓶颈问题，开发集约化反刍家畜养殖自动智能饲喂和体重评估设备，研究反刍家畜基于压力传感器的动态自动分群技术、基于计算机视觉参数的体况评分技术、基于颈环装置监测采食量、反刍、活动量与呼吸频率的生理感知技术，构建反刍家畜健康监测与疾病预警模型，结合大数据分析、人工智能等手段建立整合养殖环境、养分供给及生产管理的精细养殖系统，为实现反刍家畜养殖个性化精准营养工程、推进现代智慧养殖的发展奠定基础。

4 反刍家畜全生命周期营养调控实践及其效应

随着现代反刍家畜饲养标准的发展，动物特定阶段日粮配制技术不断完善，同时在分子生物学、计算机科学、生物信息学、智能装备等多学科融合发展支撑下，不断向系统的全生命周期精准日粮设计第3阶段发展。本文研究团队多年来聚焦“反刍家畜营养与生理调控”，以牛、羊为试验动物，践行和丰富反刍家畜全生命周期营养理论，在妊娠期、幼龄阶段、育肥期和泌乳期等反刍家畜特定阶段营养调控理论、日粮配制及生命早期营养对后代的长期影响基础研究方面开展了大量研究，并取得了显著的实践效应。

4.1 反刍家畜妊娠期和泌乳期营养调控

妊娠阶段是胎儿生长发育关键时期，本文研究团队前期营养调控试验研究表明可将母畜妊娠期分为妊娠前期、中期和后期。妊娠前期适当降低精料比例以节约成本，妊娠中期和后期逐渐增加精料比例以满足胎儿发育所需的营养。以山羊为例，母羊妊娠后期蛋白和能量不足明显降低新生羔羊血清和组织超氧化物歧化酶基因的表达水平，出生后羔羊须经过6周的营养恢复，结果显示母羊妊娠期营养不足会损伤子代羔羊长期的正常抗氧化功能[11]。另外，妊娠后期能量和蛋白不足会抑制新生羔羊的免疫性能，出生后羔羊经过6周的营养恢复，营养限制组子代羔羊面对细菌感染时更易发生免疫紊乱[12]。

围产期是母畜至关重要的一个时期，围产期奶牛

机体处于能量负平衡状态，影响其产后繁殖和生产性能。在围产期奶牛日粮中补充外源性过瘤胃葡萄糖可提高泌乳前期奶牛产奶量10%以上，改善奶牛免疫功能，促进子宫复旧[13,14]。以上结果证明了反刍家畜妊娠期和围产期营养对其繁殖性能及其子代生长发育的长期影响，提示在反刍家畜生产中不能忽略繁殖母畜营养调控。

4.2 幼龄反刍家畜营养调控

幼龄阶段是动物生长过程中的重要阶段，初乳、开食料等关键营养素的供给对于幼畜瘤胃发育、胃肠道微生物群落组成及其成年后生产性能具有长效作用。团队前期研发了幼龄反刍家畜胃肠道功能和微生物菌群的营养调控技术，研究发现尽早采食足量初乳提高新生羔羊和犊牛免疫球蛋白G水平，促进肠道乳酸菌等有益微生物的早期定植[15]；发现添加富含淀粉的精补料可提高羔羊瘤胃碳水化合物消化吸收效率，促使瘤胃发酵模式从乙酸型向丙酸型发酵转变[16]；添加蛋氨酸和赖氨酸等限制性氨基酸可提升生长羊胃肠道氨基酸感应和转运效率[17]。研究发现断奶羔羊日粮蛋白质或能量供应不足超过6周以上会引起消化道抗氧化能力下降，即使营养恢复9周以上其抗氧化能力都不能恢复，这揭示了幼龄期营养供应不足将导致动物肠道发育迟滞进而限制其生长发育[18]。

4.3 反刍家畜肉品质营养调控

牛羊肉中富含猪、禽肉无法比拟的*n*-3多不饱和脂肪酸（*n*-3 PUFAs）、肉毒碱、肌氨酸等功能成分，在调节胆固醇、预防糖尿病、心血管疾病及癌症等方面显现出有益作用。生产富含*n*-3 PUFAs的优质牛羊肉是实现草食畜牧业高质量健康发展和改善人类营养健康的重要渠道之一[10]。育肥阶段是牛羊肉功能性成分尤其是脂肪酸和氨基酸积累的关键生理期，针对此阶段研发的育肥料主要考虑饲料的性价比和对牛羊肉品质的影响。在前期应用植物功能成分调控反刍家畜畜产品品质的研究中，发现日粮中添加3.0—4.0 g/kg儿茶素可有效改善肉羊肌肉品质，提升其肌肉中不饱和脂肪酸的比例[19]。

羊肉独特的膻味是部分消费者拒绝羊肉的主要原因之一，其膻味物质主要包括支链脂肪酸、硬脂酸、酚类和吲哚等物质。羊肉的膻味受品种、性别、年龄、日粮等因素的影响，筛选表征羊肉膻味的特征物质，并系统解析典型风味物质形成和累积的调控网络对于研发阻抑羊肉膻味累积的营养调控方案至关重要。笔者团队近年来集中攻关研发了一系列的低膻养殖技术，可为高品质牛羊肉品牌塑造提供支持。研究表明，添加柠条提取物（主要成分是多酚、生物碱等）的育肥料，可以显著降低呼伦贝尔羊皮下脂肪膻味物质（4-甲基辛酸、4-乙基辛酸和4-甲基壬酸）的含量，在肉用反刍家畜育肥阶段通过应用功能性添加剂可有效提升畜产品中的功能性成分，改善肉品口味。

4.4 奶牛泌乳期营养调控

生鲜乳中的生物活性物质对人体骨骼健康、心脏健康、体重控制、情绪调整、免疫防御、消化系统健康等多个方面发挥重要作用。乳脂作为生鲜乳质量的一个重要评价标准，除了为机体提供能量，同时其中的必需脂肪酸、脂溶性维生素、甾醇、磷脂等生物活性物质，可发挥特定的生物活性功能。笔者团队前期研究发现，每天添加50 g复合植物提取物（有效成分为酚酸类、二萜类、五环三萜类和黄酮类）可使三河牛平均产奶量提高2.04 kg/头，乳脂率提高12%，增加养殖效益（日均5.34元/头）。热应激期将奶牛日粮阴阳离子差从33.5 m Eq/100 g DM提高到了50.7 m Eq/100 g DM，可显著提高日粮营养消化率，牛奶体细胞数降低30%，标准乳产量提高4%[20]；热应激奶牛日粮中添加日均16 g/头水平L-茶氨酸可使奶牛热应激状况得到有效缓解，奶牛呼吸频率下降8%—10%，产奶量提高4%—10%，泌乳效率提高2%—4%[21]。通过解析反刍家畜对乳脂前体物的转运途径和累积规律，

以构建提升乳脂的日粮调控技术，可实现乳品质的有效提升和功能乳制品品牌塑造。

5 全生命周期营养理论对呼伦贝尔草原优质肉羊产业发展的指导作用

呼伦贝尔羊是呼伦贝尔牧区优良地方品种。然而，呼伦贝尔草原羊大多采用一年一产粗放的养殖模式，呼伦贝尔羊全生命周期关键阶段营养需求不明、饲草料营养特征完善及供需季节性失衡、养殖模式与市场需求不协调，导致饲料配方欠科学、饲料转化率低、养殖效益差。同时，一年一产养殖模式下，草原羊出栏集中在秋季，羊肉供应全年波动明显，严重制约了呼伦贝尔草原羊产业的发展。呼伦贝尔农垦集团拥有600万亩耕地和1000万亩草场，可为支撑优质肉羊产业发展提供富足资源。中国科学院自2013年开始与呼伦贝尔农垦集团（以下简称“农垦集团”）合作，双方建立了良好的合作关系；通过近几年生态草牧业示范区建设[22]，农垦集团逐步走上“由农转牧、农牧结合、以牧为主”的发展思路。针对呼伦贝尔羊，“十四五”期间农垦集团重点推进“种（种植）、种（品种）、养（养殖）、研（研发）、加（加工）、销（销售）”年出栏100万只羊目标的“七场（厂）一基地一平台（即原种场、扩繁场、养殖场、饲料厂、有机肥厂、肉联厂、食品厂、饲草基地、信息交易平台）”全产业链现代化羊产业生产和科技支撑体系构建。通过草牧业科技与现代饲养模式创新，以科技赋能让草原生态得以恢复，实现“以小保大”（用小面积人工草地建设换取大面积天然草地的保护与修复）[23]，同时畜牧业产出大幅提升，实现自然生态与肉羊产业协调良性发展，届时羊全产业链预计将达到年产值20亿元人民币左右规模。

呼伦贝尔草原羊高效饲养是助推羊全产业链发展的关键纽带，既可通过充足营养供给保障优良肉羊品种的高效繁育，又可通过功能型日粮提升羊肉品质以生产高档羊肉产品。围绕全生命周期、全日粮配方和全产业链3个方向，以第3阶段全生命周期精准化营养设计与供给为发展目标，重点从4个方面不断完善呼伦贝尔草原羊全生命周期营养理论和工程体系：① 根据生产目的不同，草原肉羊可分为育肥羔羊、繁殖用母羊和种用公羊三大类群体，构建不同群体全生命周期“从出生到出栏”动态营养需求标准；② 依托草场资源，草原肉羊暖季放牧并适量补充精饲料，而冷季利用包括粗饲料和精饲料的全日粮配方进行舍饲，在充分利用本地饲草料基础上，完善一年一产和两年三产不同养殖模式下“暖牧冷饲”日粮配制方案；③ 利用“澳洲白”等优质种公羊与呼伦贝尔羊母羊进行杂交以提高子代羔羊出栏体重和经济效益的技术，已初步得到当地养殖户认可和推广，后续需要完善遗传改良后代肉羊全生命周期动态营养需求标准，以适应呼伦贝尔羊遗传改良后的精准日粮配制；④ 为生产优质羊肉，打造呼伦贝尔农垦高端品牌，基于全生命周期营养理论对特定窗口期加强羊肉中风味氨基酸、不饱和脂肪酸、膻味物质等重要功能成分的靶向日粮配制技术和功能型饲料产品研发[10]。

6 结语

精准营养的时代需求呼唤着对传统反刍家畜营养与日粮配制技术进行创新和发展。推动全生命周期营养理论和工程体系的构建是当代反刍家畜营养学和饲料科学的一项重大历史发展任务。我国反刍家畜种类众多，在草原牧区、农牧交错带、传统农区和南方草山草坡地区等草牧业适宜发展区域反刍家畜生产养殖模式不同。因此，针对不同种类家畜、不同养殖模式，在国家战略层面围绕反刍家畜全生命周期营养工程开展重大基础研究、重大技术攻关和重大产品开发，完善反刍家畜全生命周期营养理论，建立资源高效利用的饲草料生产体系，推进反刍家畜全生命周期营养工程发展，持续构建不同种类反刍家畜全生命周

期营养理论与工程体系，将在破解我国草畜协同与产业提质增效挑战性难题、推动草食畜牧业走高质量发展以及贯彻国家粮食安全战略道路上发挥重要作用。

参考文献

1 贺志雄, 周传社, 王敏, 等. 草食畜牧业乳肉功能性产品发展的战略思考. 中国科学院院刊, 2021, 36(6): 685-691.

He Z X, Zhou C S, Wang M, et al. Developing strategies of functional milk and meat products from herbivorous animal husbandry. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(6): 685-691. (in Chinese)

2 宋新明. 全生命周期健康:健康中国建设的战略思想. 人口与发展, 2018, 24(1): 3-6.

Song X M. Health in the whole life cycle: Strategic of building a healthy China. Population and Development, 2018, 24(1): 3-6. (in Chinese)

3 Barker D J, Hales C N, Fall C H, et al. Type 2 (non-insulin-dependent) diabetes mellitus, hypertension and hyperlipidaemia (syndrome X): Relation to reduced fetal growth. Diabetologia, 1993, 36(1): 62-67.

4 Soberon F, Van Amburgh M E. The effect of nutrient intake from milk or milk replacer of preweaned dairy calves on lactation milk yield as adults: A meta-analysis of current data. Journal of Animal Science, 2013, 91(2): 706-712.

5 卢德勋. 优化饲养设计——传统日粮配合技术的发展. 内蒙古畜牧科学, 1997, (S1): 30-38.

Lu D X. Optimization of feeding design: Development of traditional diet formulation technology. Inner Mongolia Animal Science, 1997, (S1): 30-38. (in Chinese)

6 卢德勋. 大力推进日粮学理论和技术体系的创新和发展. 饲料工业, 2014, 35(1): 1-8.

Lu D X. To devote major efforts to innovations and development of dietics theoretic and technical system. Feed Industry Magazine, 2014, 35(1): 1-8. (in Chinese)

7 贺春禄. 个性化全生命周期精准营养时代即将开启. 高科技与产业化, 2018, (7): 46-49.

He C L. The era of personalized full life cycle precision nutrition is about to open. High-Technology and Industrialization, 2018, (7): 46-49. (in Chinese)

8 Lutter C K, Lutter R. Fetal and early childhood undernutrition, mortality, and lifelong health. Science, 2012, 337: 1495-1499.

9 王来有. 欧盟禁止蛋鸡传统笼养的进程和影响. 畜牧兽医科技信息, 2012, (3): 10-11.

Wang L Y. The process and influence of European Union prohibition of traditional cage raising of laying hens. Chinese Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2012, (3): 10-11. (in Chinese)

10 齐志国, 郭江鹏, 陈余, 等. 功能性饲料及其功能因子概述. 饲料研究, 2017, (12): 1-7.

Qi Z G, Guo J P, Chen Y, et al. Functional feed and its functional factors. Feed Research, 2017, (12): 1-7. (in Chinese)

11 He Z X, Sun Z H, Tan Z L, et al. Effects of maternal protein or energy restriction during late gestation on antioxidation status of plasma and immune tissues in postnatal goats. Journal of Animal Science, 2012, 90: 4319-4326.

12 He Z X, Sun Z H, Yang W Z, et al. Effects of maternal protein or energy restriction during late gestation on immune status and responses to lipopolysaccharide challenge in postnatal young goats. Journal of Animal Science, 2014, 92: 4856-4864.

13 Li X P, Tan Z L, Jiao J Z, et al. Supplementation with fat-coated rumen-protected glucose during the transition period enhances milk production and influences blood biochemical parameters of liver function and inflammation in dairy cows. Animal Feed Science and Technology, 2019, 252: 92-102.

14 Wang Y, Han X F, Tan Z L, et al. Rumen-protected glucose stimulates the insulin-like growth factor system and mTOR/AKT pathway in the endometrium of early postpartum dairy cows. Animals, 2020, 10(2): 357.

15 杨超, 田全华, 阳利, 等. 饲喂初乳对新生羔羊肠道渗透性及黏附微生物组成的影响. 动物营养学报, 2021, 33(3): 31503-31512.

Yang C, Tian Q H, Yang L, et al. Effects of feeding colostrum on intestinal permeability and mucosa-attached microbial composition of neonatal goats. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2021, 33(3): 31503-31512. (in Chinese)

16 Jiao J Z, Li X P, Beauchemin K A, et al. Rumen development process in goats as affected by supplemental feeding v. grazing: Age-related anatomic development, functional achievement and microbial colonization. British Journal of Nutrition, 2015, 113(6): 888-900.
17 Zhu X L, Jiao J Z, Zhou C S, et al. Effects of dietary methionine and lysine supplementation on nutrients digestion, serum parameters and mRNA expression of related amino acid sensing and transporting genes in growing goats. Small Ruminant Research, 2018, 166: 1-6.
18 Sun Z H, He Z X, Zhang Q L, et al. Effects of protein and/or energy restriction for six weeks on antioxidation capacity of plasma and gastrointestinal epithelial tissues of weaned kids. Livestock Science, 2012, 149: 232-241.
19 Tan C Y, Zhong R Z, Tan Z L, et al. Dietary inclusion of tea catechins changes fatty acid composition of muscle in goats. Lipids, 2011, 46(3): 239-247.
20 Li X, Tang S, Wang Z, et al. Effects of dietary cation-anion difference on milk performance, digestion and blood parameters in lactating cows under heat stress. Kafkas Universitesi Veteriner Fakultesi Dergisi, 2022, 28(1): 35-42.
21 Yang L Y, Zhang L M, Zhang P H, et al. Alterations in nutrient digestibility and performance of heat-stressed dairy cows by dietary L-theanine supplementation. Animal Nutrition, 2022, (11): 350-358.
22 方精云, 景海春, 张文浩, 等. 论草牧业的理论体系及其实践. 科学通报, 2018, 63(17): 1619-1631.
Fang J Y, Jing H C, Zhang W H, et al. The concept of “Grass-based Livestock Husbandry” and its practice in Hulun Buir, Inner Mongolia. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(17): 1619-1631. (in Chinese)
23 方精云, 潘庆民, 高树琴, 等. “以小保大”原理: 用小面积人工草地建设换取大面积天然草地的保护与修复. 草业科学, 2016, 33: 1913-1916.
Fang J Y, Pan Q M, Gao S Q, et al. “Small vs. Large Area” principle: Protecting and restoring a large area of natural grassland by estab-lishing a small ares of cultivated pasture. Practaculture Science, 2016, 33: 1913-1916. (in Chinese)

Devoting continuous efforts to innovations and development of ruminant livestock life-cycle nutrition program

HE Zhixiong[1,2] HU Zhaomin[3] WANG Hongsheng[4] JIAO Jinzhen[1] HAN Xuefeng[1] LIU Yong[1] TANG Shaoxun[1] ZHOU Chuanshe[1,2] WANG Min[1,2] TAN Zhiliang[1,2*]

（1 CAS Key Laboratory for Agro-Ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China;
2 College of Advanced Agricultural Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3 Hulun Buir State Farm, Hailar 021008, China;
4 Bureau of Science and Technology for Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China）

Abstract Ruminant livestock such as cattle and sheep can provide high-quality beef, mutton and milk, which are high-quality protein sources meeting the increasingly diverse food consumption needs for human being. Developing high-quality herbivorous animal husbandry is a concrete practice of practicing the “Greater Food” approach. The precise supply of forages and concentrates meeting the requirements of all nutrients in the whole life cycle is vital for cost saving and efficiency increasing of ruminant livestock industry,

*Corresponding author

which is an important way to high-quality development. The whole life cycle nutrition is developed on the basis of traditional ruminant nutrition and new technologies made breakthroughs in understanding life and health. Its essence lies in optimizing the ration formulation based on the theory of systematic nutrition regulation and the theory of short-term and long-term effects of early life nutrition, with a final goal to establish precision nutrition system in combination with technologies in big data and artificial intelligence. Compared with the traditional technology in ration formulation, it is obviously scientific, systematic, and progressive. In this study, the concept, significance, and goals of whole life cycle nutrition in ruminants are briefly introduced. This paper elaborates the key scientific issues and technological problems in the development of whole life cycle nutrition system of ruminant livestock in China, and summarizes the research progress on nutrition regulation, diet formulation, and fundamental research on the long-term impact of early life nutrition in ruminants. Finally, taking the development of modern grassland sheep industry in Hulun Buir State Farm Conglomerate as an example, the concept of building whole life cycle nutrition and promoting high-quality development of ruminant livestock industry is discussed from the aspects of whole life cycle division, whole diet formula, and whole industry chain.

Keywords whole life cycle nutrition, ruminant livestock, ration formulation, "Greater Food" approach

贺志雄 中国科学院亚热带农业生态研究所研究员。主要从事幼龄草食动物营养生理研究。E-mail: zxhe@isa.ac.cn

HE Zhixiong Professor, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences. His research focuses on the nutritional physiology of young herbivores. E-mail: zxhe@isa.ac.cn

谭支良 中国科学院亚热带农业生态研究所所长、研究员。长期从事动物营养生理方面的研究工作。E-mail: zltan@isa.ac.cn

TAN Zhiliang Professor and Director of Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences. He has long been engaged in research on animal nutrition and physiology. E-mail: zltan@isa.ac.cn

■责任编辑：文彦杰